

実データのためのフィールド位相を強調した ボリュームレンダリング

竹島 由里子 山口 裕美 高橋 成雄[†] 藤代 一成[‡]

お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科

† 群馬大学 総合情報処理センター

‡ お茶の水女子大学 理学部情報科学科

{yuriko, yumi}@imv.is.ocha.ac.jp, shigeo@lab.cc.gunma-u.ac.jp, fuji@is.ocha.ac.jp

さまざまな分野でボリュームビジュアライゼーションが広く用いられるようになってきたにもかかわらず、可視化の専門家でないユーザが意味のある情報を生成できるように可視化パラメタ値を調整することは未だ困難である。我々は先行研究で、3次元フィールド位相解析に基づいて半自動設計された伝達関数を用いたコンプリヘンシブルボリュームレンダリング法を提案した。本稿では、実世界のデータを扱うための4つの問題に着目し、同方法を拡張する。医療CTスキャンデータを用いて、拡張した方法の有効性を検証する。

Topologically-Accentuated Volume Rendering for Real Datasets

Yuriko Takeshima Yumi Yamaguchi Shigeo Takahashi[†] Issei Fujishiro[‡]

Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

† Computer Center, Gunma University

‡ Department of Information Sciences, Ochanomizu University

In spite of many attempts at making popular volume visualization, it is still a hard task for novice users to adjust rendering-related parameter values for generating informative images. In our previous study, a comprehensible volume rendering method was proposed, which takes advantage of a 3D field topology analysis for semi-automatic design of proper transfer functions. In this article, we address four specific issues to adapt the method for dealing with real world datasets. A medical CT-scanned dataset is used to prove the feasibility of the extended method.

1 はじめに

さまざまな分野で、ポリウムビジュアライゼーションは、大規模計測やシミュレーションによって得られた3次元データセットの内部構造や複雑な振舞いを探究するのに必要不可欠なツールとなってきた。しかし、意味のある画像を得られるように、関連するレンダリングパラメータ値を調整することは、可視化の専門家でないユーザにとっては未だ困難なタスクである。

ポリウムレンダリングされた画像の質を決定する重要なファクタの1つとして、与えられたポリウムデータセットの物理フィールドを色や不透明度のような光学的属性に変換する伝達関数が知られている。これまで、伝達関数を(半)自動設計する手法がいくつか提案されてきており、それらは画像中心(image-centric)とデータ中心(data-centric)の大きく2つのアプローチに分類することができる。

我々がこれまでに提案してきた手法[1, 2]は、データ中心アプローチの1つであり、3次元フィールド位相解析を利用して、伝達関数の半自動設計を行っている。具体的には、3次元サーフェイスの位相モデリングであるレーブグラフ(Reeb graph)に基づく手法[3, 4]を拡張したハイパーレーブグラフ(hyper Reeb graph: HRG)を利用して、3次元ポリウムフィールドの位相的骨組を表現する。これを、伝達関数設計のための基本的な参照構造として使い、色および不透明度の伝達関数を強調する2つの方法を提案した。また、本手法を原子衝突の大規模4次元シミュレーションデータに適用し、その有効性を検証した。

本稿では、対象とするオブジェクトのあいまいな構造や測定誤差などをもつ実世界のデータセットを扱うために、この位相構造を強調したポリウムレンダリングを拡張する方法を試みる。次節で基本方法の概略を説明したのち、3節で、米国NMLから提供されている歯のCTスキャンデータを実例として用いて、提案するポリウムフィールドの位相解析および伝達関数設計法を説明する。最後に4節で、今後の課題に触れる。

2 基本概念

図1に、我々が提案する位相的特徴を強調するポリウムレンダリング[1, 2]の基本プロセスを示す。

ここでは、対象データとして、水素分子の3次元電荷密度分布を表す解析的ポリウムデータ(以後 H_2 とよぶ)を用いた。図1(a)は、一般的に使用されている、色相が線形変化、不透明度が一定の伝達関数を用いて H_2 データをポリウムレンダリングしたものである。可視化には、汎用可視化ソフトウェアAVS/Express ver.5.0¹のレイキャストインゲルモジュールvolume renderを用いた。

理論的に、ポリウムは異なるフィールド値からなる無限枚の等値面に分割することが可能である。高さ関数の軸方向をあらかじめ設定しておくことにより、各等値面の位相的特徴はレーブグラフを用いて表現することができるので、隣接等値面のレーブグラフを比較することによって、臨界フィールド値(critical field value: CFV)とよばれる、連続した等値面の同相性がくずれる特別なフィールド値をみつけることができる。HRGは、位相的データを記述する2層からなる階層的グラフである。グラフの上層は、CFVを昇順に並べた有向線形グラフで、CFV $f_i (i = 1, \dots, m)$ を与える m 個のノード v_i と、解析する最小、最大フィールド値 f_0, f_{m+1} を与える2つの境界ノード v_0, v_{m+1} をもつ。 v_i, v_{i+1} を結ぶエッジ $e_{i,i+1}$ は、フィールド区間長 $l_{i,i+1} (= f_{i+1} - f_i)$ を重みとし、下層でこの区間で同相なレーブグラフを表している。ここで、フィールド区間が開(閉)のとき、ノードを白丸(黒丸)で表すことにする。

簡単な計算により、 H_2 ポリウムがただ1つのCFVをもつことがわかる。このフィールド値を境に、フィールド値の低い領域では等値面が1つだったものが、フィールド値の高い領域で2つの原子核まわりの2領域に分かれる。高さ関数を y 軸にそって定義したときの H_2 ポリウムのHRGを図1(b)に示す。一般に、高さ関数の軸方向を変えると、異なるレーブグラフが得られることから、レーブグラフはあいまいではないが、一意ではないサー

¹AVSはAdvanced Visual Systems, Inc.の登録商標である。

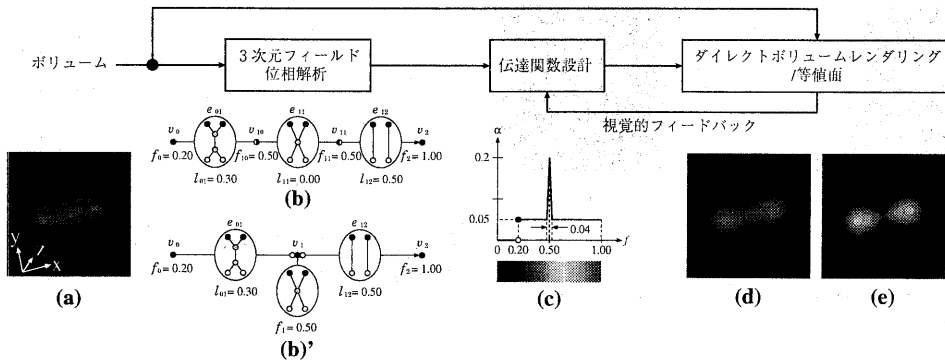


図 1: 位相構造を強調するポリリュームレンダリングの基本プロセス

フェイス位相の表現である。ここで、 v_{10}, v_{11} は同じフィールド値 $f_{10} = f_{11} = 0.50$ をもち、その間のエッジ e_{11} の長さ l_{11} が 0 であるため、得られた CFV は退化した等値面を与えていることに注意されたい。このような場合の HRG に対して、図 1(b)' に示すような略記法を利用する。

HRG は、コンプリヘンシブルポリリュームレンダリングのための伝達関数設計の基本参照構造として利用することができる。伝達関数設計の基本アイデアは、CFV 付近のポリリュームフィールドで色（色相）と不透明度を変化させることによって、位相変化を強調することである。ここでは、フィールドサブドメイン $[f_0, f_{m+1}]$ における伝達関数設計法を提案する。色相と不透明度の伝達関数はサブドメインの外では、それぞれ、未定義と 0（完全透明）であるとする。色相の伝達関数は、フィールド値に対して線形増加させるが、各 CFV $f_i (i = 1, \dots, m)$ では一定値だけ増加させるものとする。一方、不透明度の伝達関数は、各 CFV $f_i (i = 1, \dots, m)$ 付近で山型に小さく突起させ、それ以外では一定値をとるように設計する。

図 1(c) は、本手法によって位相構造を強調した H_2 ポリリュームの不透明度と色相の伝達関数である。それを用いてポリリュームレンダリングした図を、図 1(d) に示す。

また、同相なフィールド区間 $[f_i, f_{i+1}] (i = 0, \dots, m)$ の中間点で、 $m + 1$ 枚の半透明な等値面を表示することも可能である。このとき、同相な

フィールド区間の相対的な厚さがわかりやすいように、各等値面の不透明度値を、 $l_{i,i+1} (i = 0, \dots, m)$ に関連して決定し、退化した等値面では、任意の不透明度値を与える。図 1(e) は H_2 ポリリュームをインダイレクトポリリュームビジュアリゼーションで描画した結果である。いずれのアプローチも、図 1(a) と比較して、同相なサブポリリュームを視覚的に理解するのにより有効であることがわかる。

位相的に強調することは、任意のポリリュームデータセットに対して、常に最良の伝達関数を与えるとは限らない。しかし、適度の初期推測によって、伝達関数の再設定の回数を減少させることができ、より効率的な視覚的探究が実現できると考えられる。

3 実世界データへの適用

実世界のポリリュームデータの例として、 $128 \times 128 \times 80$ ボクセル、8 ビットデータである、歯の CT スキャンデータセットを用いる。オリジナルのデータセット ($256 \times 256 \times 161, 16$ ビット) は、Vis2000 のパネル [5] で用いられた 3 つのデータセットのうちの一つであり、米国 National Library of Medicine から得ることができる [6]。

図 2 に、歯データのポリリュームビジュアリゼーションの結果を示す。図 2(a) は、色相が線形変化、不透明度が一定の伝達関数を用いてポリリュームレンダリングしたものである。ここで、歯のまわりの最も外側の材質は、階段状の不透明度伝達関数を用いて、あらかじめ除外していることに注意されたい。

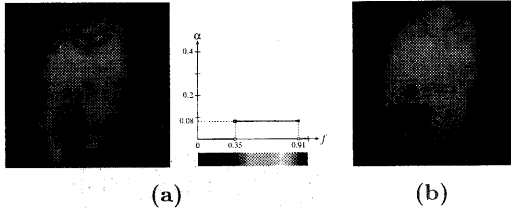


図 2: 歯データの基本的な可視化. (a) ボリュームレンダリング結果とその伝達関数; (b) 材質境界における等値面

図 2(b) は、歯内部の材質境界付近のフィールド値で抽出された複雑な等値面を描いたものである。このようなデータの場合、境界付近の等値面の位相構造が複雑すぎるため、レーブグラフを構成するのは困難である。また、連続する等値面間の位相的な相関性が保持されないため、ほとんどのフィールド値が CFV となり、HRG が複雑になってしまう。このような点から、前節で説明した基本方法を改良する必要がある。

本稿では、次の 4 つの点で基本方法を拡張する。

1. 任意位相の面を扱えるようにレーブグラフ抽出アルゴリズムを拡張
2. HRG の骨組み情報の欠落がない単純化
3. 混合材質境界表現のための CFV 概念の一般化
4. 不明瞭な材質境界を目立たなくし、同相な領域を強調するような伝達関数の設計

3.1 任意位相等値面のためのレーブグラフ構成

前節で述べたように、我々は 3 次元フィールド位相解析に、等値面位相の表現としてレーブグラフに基づく方法を用いている。レーブグラフはあらかじめ定義した高さ関数の軸にそって、面の位相的骨組みを表現するものである。レーブグラフは、頂点、峠、底点の 3 つの特異点を表すノードをもち、それらを結ぶ連続断面上の同相な連結コンタの集合を表すエッジによって位相的に特徴付けられる。図 3(a) に、クレータをもつ球 (左) とそのレーブグラフ (右) を示す。

レーブグラフは、文献 [4] で提案された、アルゴリズムを用いて抽出することができる。これは、は

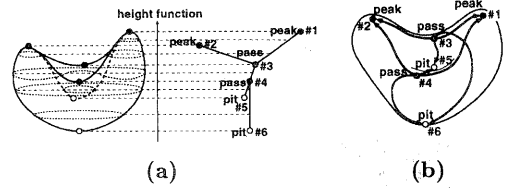


図 3: レーブグラフ構成の例. (a) クレータ付き球とそのレーブグラフ; (b) サーフェイスネットワークとそのレーブグラフ

じめにオイラーの公式を満たすように面上のすべての特異点を抽出し、面上の尾根線や谷線からサーフェイスネットワークを構成するものである。サーフェイスネットワーク [7] は、ノードが特異点を表し、尾根線や谷線で各ノードを結ぶため、レーブグラフを構成するのに最も適した表現の一つである。図 3(b) は、図 3(a) のサーフェイスネットワークの例を示したものである。特異点間の関係を用いてサーフェイスネットワークの結合を変換することによって、対応するレーブグラフを得ることができる。

多面体で構成される面からレーブグラフを効率的に抽出するために、このアルゴリズムで扱える面は、球と同相なものに限られていた。これは、球のレーブグラフが木構造であることに起因する。実世界のデータセットから得られる任意位相の等値面に適用するために、レーブグラフのサイクル部分を木から分割する方法でアルゴリズムを拡張する。詳細は文献 [8] を参照されたい。

3.2 レーブグラフの単純化

等値面化には、最も良く知られているマーチングキューブ法 [9] と、その三角形パッチ接続の位相の一貫性を維持するための補助アルゴリズムである漸近線判定補助アルゴリズム [10] を利用する。

実世界のデータセットから抽出された等値面は、高周波ノイズをもつため多くの特異点をもち、本来の位相構造が隠れてしまう。この問題を避けるために、我々は 2 段階のレーブグラフの単純化を行う。

目的の等値面の位相を変えずにレーブグラフを構成するために、文献 [11] で提案された拡張されたガウシアンフィルタ (Taubin フィルタ) を適用し、

なめらかな等値面を得る。この方法の計算量は等値面を表す頂点の数に比例する。次に、レーブグラフによる連続する等値面の位相構造の比較を容易にするために、ある特定の距離内にあるノードの枝切りを行う。

図4に、歯データから抽出した等値面のレーブグラフを簡単化する流れを示す。図4(a)は、3,784パッチからなる元の等値面である。図4(b)は、元の接続を維持したなめらかな等値面を得るために、Taubinフィルタを50回適用したものである。なめらかな等値面から抽出されたレーブグラフは、52個の特異点(頂点: 6, 峠: 20, 底点: 26)をもつ。次に、隣接するノードが半径3.2(単位=隣接ボックス間の距離)以内に属するものを枝切りすると、特異点の総数は10個(頂点: 3, 峠: 2, 底点: 5)に減少した。ここで、Taubinフィルタリングの前後で、抽出された特異点のオイラーの公式の特性値は保存されることに注意されたい。

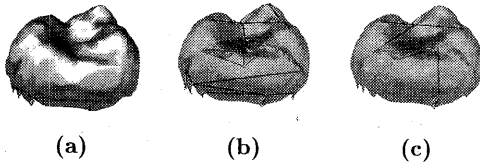


図4: 歯データから抽出された等値面におけるレーブグラフの簡単化。(a) オリジナルの等値面; (b) なめらかな等値面のレーブグラフ; (c) 枝切り後のなめらかな等値面のレーブグラフ

3.3 HRG 構成アルゴリズムの改良

HRG 構成で最も重要なポイントは、CFV の位置をみつけることである。本手法では、ユーザがあらかじめ特定したフィールド区間を粗くサンプリングし、それらのフィールド値から得られた等値面のレーブグラフを比較しながら、CFV を二分探索法を用いてみつける。ここで、新たに、いずれの連続フィールド値における等値面もレーブグラフに関して位相的に複雑であるようなフィールド区間を臨界フィールド区間 (critical field interval: CFI) と定義する。

一方、2つのレーブグラフの同相性を決定するために、グラフの2種類の特性量、すなわち、特性多項式と距離多項式の係数の絶対値の和 [12] を計算し、比較する、これらの特性量は、レーブグラフが全く同じかどうかを判定するものなので、今後、隣接するレーブグラフ間の類似性を図る測度を導入する必要がある。

図5は、図2に示した歯データの HRG である。HRG から、歯の2つの材質の境界に CFI (f_{10}, f_{11}) が存在していることがわかる。

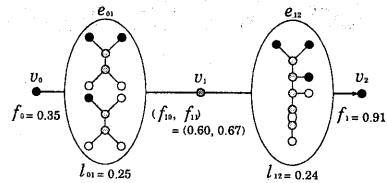


図5: 歯データのハイパーレーブグラフ

3.4 伝達関数設計

図5から、歯データが1つのCFIをもつことがわかった。より効果的な画像を得るためには、2つの同相なフィールド区間を強調して描画するべきであると考えられる。そこで、CFIを完全透明として不透明度伝達関数を設計した。

図6(a)は、本手法で設計した伝達関数を用いてボリュームレンダリングした画像である。図6(b)は、2つの同相なフィールド区間の、中間点における半透明な等値面を、ともに表示したものである。フィールド値をうまく選択することによって、少ない等値面でボリューム全体の位相構造を明らかにすることができる。図6(c)は、文献[13]で提案されたフィールド導関数解析に基づく方法によって、不透明度伝達関数を強調してボリュームレンダリングしたものである。Kindlmannは、この方法を用いて伝達関数コンペのパネル[5]で第1席をとっている。この方法は、フィールド関数と1次および2次導関数の相互関係によって、境界構造を見つけるものであり、ユーザは、視覚的探求の目的に応じて、見つけられたピークフィールド値を選択することが

できる。図6の比較から、本手法は Kindlmann の方法とはほぼ同等な視覚的効果が得られているといえる。Kindlmannの方法はフィールド勾配の統計的解析を行っているので、任意のボリュームに対して適用することが可能であるが、 H_2 データのようにフィールド値がほぼ一様なボリュームデータからは CFV を抽出できないことに注意されたい。

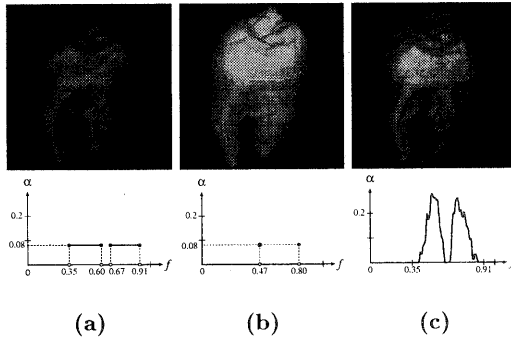


図 6: 歯ボリュームのコンプリヘンシブルボリュームレンダリング。(a) 図 5 の HRG に基づいて強調した伝達関数; (b) 2 つの関連する等値面の同時表示; (c) フィールド導関数解析による伝達関数

4 まとめと今後の課題

本稿では、実世界のデータセットを扱うために、ボリュームフィールド位相解析に基づく伝達関数の半自動設計法を拡張した。HRG を用いて、洗練されたインダイレクト/ダイレクトボリュームビジュアライゼーションを行うことによって、ボリュームデータに潜む内部構造や動的振舞いを、より効果的な視覚情報として提供可能であることがわかった。

提案した方法はさらに一般化できる。例えば、スプラッティングやセルプロジェクションのようなフォワードアプローチのボリュームレンダリング法と組み合わせることも可能である。さらに、与えられたデータセットから連続する等値面さえ抽出できれば、入力ボリュームデータの格子構造に依存せずに適用可能である。

さらに本手法を改良する方針として、HRG の LOD 制御のための CFV および CFI の順序付け、高さ関数の軸の摂動解析、複数のデータ中心伝達関

数設計法のための統合環境の構築 [14] の 3 つが挙げられる。

参考文献

- [1] Fujishiro, I., Azuma, T. and Takeshima, Y.: Automating Transfer Function Design for Comprehensible Volume Rendering Based on 3D Field Topology Analysis, *Proc. Vis'99*, pp. 467-470, p. 563 (1999).
- [2] Fujishiro, I., Azuma, T., Takeshima, Y. and Takahashi, S.: Volume Data Mining Using 3D Field Topology Analysis, *CG & A*, Vol. 20, No. 5, pp. 46-51 (2000).
- [3] Shinagawa, Y. and Kunii, T.: Constructing a Reeb Graph Automatically from Cross Sections, *CG & A*, Vol. 11, No. 6, pp. 44-51 (1991).
- [4] Takahashi, S., Ikeda, T., Shinagawa, Y., Kunii, T. and Ueda, M.: Algorithms for Extracting Correct Critical Points and Constructing Topological Graphs from Discrete Geographical Elevation Data, *Computer Graphics Forum*, Vol. 14, No. 3, pp. 181-192 (1995).
- [5] Pfister, H., Lorensen, W., Schroeder, W., Bajaj, C. and Kindlmann, G.: Panel: The Transfer Function Bake-Off, *Proc. Vis 2000*, pp. 523-526 (2000).
- [6] <http://visual.nlm.nih.gov/data/>
- [7] Pfaltz, J. L.: Surface Networks, *Geographical Analysis*, Vol. 8, pp. 77-93 (1976).
- [8] Takahashi, S., Fujishiro, I., Takeshima, Y. and Yamaguchi, Y.: An Extended Algorithm for Constructing Reeb Graphs for Surfaces of Arbitrary Topological Type (*tentative*), *Graphical Models* (2000) (to be submitted).
- [9] Lorensen, W. and Cline, H.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *ACM Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169 (1987).
- [10] Nielson, G. and Hamann, B.: The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes, *Proc. Vis'91*, pp. 83-90 (1991).
- [11] Taubin, G.: A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIG-GRAPH*, pp. 351-358 (1995).
- [12] Kier, L. and Hall, L.: *Molecular Connectivity in Chemistry and Drug Research*, Academic Press (1976).
- [13] Kindlmann, G. and Durkin, J. W.: Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering, *Proc. Symposium on Volume Visualization*, pp. 79-86, p. 170 (1998).
- [14] 山口裕美, 藤代一成, 竹島由里子, 高橋成雄: ボリュームデータマイニングのための伝達関数の合成, 情報メディア学会誌 (投稿中)